

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



REC'D 29 JAN 2004
WIPO PCT

Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 102 58 130.4

Anmeldetag: 29. November 2002

Anmelder/Inhaber: Christoph W a g n e r , Erlangen/DE; OBE Ohnmacht & Baumgärtner GmbH & Co KG, Ispringen/DE.

Erstanmelder:
Christoph W a g n e r , Erlangen/DE

Bezeichnung: Verfahren und Vorrichtung zur optischen Form-
erfassung von Gegenständen und Oberflächen

IPC: G 01 B 11/24

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 1. Dezember 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Lstang

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Verfahren und Vorrichtung zur optischen Formerfassung von Gegenständen und Oberflächen

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur optischen Formerfassung von Gegenständen und Oberflächen, insbesondere glänzenden Oberflächen. Mit dem Begriff glänzend werden im weiteren Gegenstände bezeichnet, deren optische Rauigkeit im Übergangsbereich zwischen optisch rauen und optisch glatten Oberflächen liegt. Optisch raue Oberflächen sind dadurch definiert, dass sie eine Rauigkeit besitzen, die wesentlich höher ist als die Wellenlänge von sichtbarem Licht (etwa 0,5 Mikrometer), während optisch glatte Oberflächen eine Rauigkeit weit unter der Wellenlänge aufweisen. Aufgrund dieser Eigenschaft zeigen optisch raue Oberflächen eine ungerichtete, diffuse Reflexion bzw. Transmission von Licht. Beispiele hierfür sind Papier, Kreide, Mattscheiben etc. Optisch glatte Oberflächen dagegen spiegeln bzw. transmittieren einfallendes Licht gerichtet. Sie sind in der Lage, ein optisches Abbild ihrer Umgebung zu erzeugen. Als Beispiele sind ebene oder gewölbte Spiegel und polierte Metall- und Glasoberflächen (Linsen) zu nennen.

Im Übergangsbereich zwischen diesen beiden Extremen liegen die als glänzend bezeichneten Gegenstände. Diese Gegenstände sind von hoher Bedeutung, da sie sehr häufig anzutreffen sind. Insbesondere industriell hergestellt Gegenstände aus Metall, Kunststoff, aber auch Holz und andere Materialien gehören zu den glänzenden Gegenständen. Die industrielle Bearbeitung solcher Materialien (spanende Bearbeitung von Metall und Holz, Spritzgießen von Kunststoff, Pulverspritzguss von Metall und Keramik etc.) erzeugt Rauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer, also in der Größenordnung der Wellenlänge von sichtbarem Licht (um 0,5 Mikrometer).

Für diffus streuende, optisch raue Oberflächen gibt es eine breite Palette von optischen 3D-Sensoren. Eines der am weitesten verbreiteten Verfahren beruht auf der Projektion von Streifenmustern. Die Muster werden aus einer Richtung projiziert und aus einer anderen mit einer Kamera beobachtet. Die Streifen scheinen für die Kamera, je nach Form des beobachteten Gegenstandes, mehr oder weniger deformiert. Aus der Deformation der Streifen kann auf die Form des Gegenstandes zurückgeschlossen werden. In der Regel

werden mehr als drei Streifenmuster projiziert, wobei die Intensität der Streifen einen sinusförmigen Verlauf annimmt.

Aus der Vielzahl der übrigen Verfahren sollen die Verfahren der Gruppe „Shape from Shading“ erwähnt werden, insbesondere das photometrische Stereoverfahren, da die Erfindung auf ihnen aufbaut. Diese Verfahren schließen aus der Helligkeitsstruktur einer Objektoberfläche auf dessen Form. Ein detailliert Beschreibung erscheint nachfolgend.

Auch für optisch glatte Oberflächen sind Verfahren bekannt, die eine dreidimensionale Vermessung ermöglichen. Zum Test von einfachen Oberflächenformen wie ebenen oder sphärischen Flächen (Linsen, Spiegel etc.) kommen vorwiegend interferometrische Verfahren zum Einsatz. Bei komplizierter geformten Flächen wie Asphären kommt das Hartmann-Verfahren und der Shack-Hartmann-Test zum Einsatz. Hier beobachtet man die Ablenkung eines dünnen Strahlenbündels durch den zu vermessenden Gegenstand. Andere Verfahren beobachten ein Gittermuster, welches an der Gegenstandsoberfläche reflektiert bzw. transmittiert wird. Je nach deren Form erscheint das Gitter mehr oder weniger deformiert. Diese Verfahren lassen sich unter dem Stichpunkt der deflektometrischen Verfahren zusammenfassen. Ihnen ist gemeinsam, dass sie die Strahlablenkung bestimmen und daraus auf die Form der Oberfläche schließen. Die deflektometrischen Verfahren beruhen auf dem Reflexionsgesetz bzw. Brechungsgesetz, das den Zusammenhang zwischen einfallendem Strahl, Oberflächennormale und dem reflektierten bzw. transmittierten Strahl beschreibt.

Die Vermessung von Oberflächen im Übergangsbereich zwischen den optisch rauen und optisch glatten Oberflächen ist allerdings bislang noch nicht gelöst. Die Verfahren der einen, als auch der anderen Kategorie versagen für diesen Fall. Man kann zwar mit einem Sensor für raue Oberflächen mit gelegentlich vorkommenden Glanzstellen zuretkommen, dominiert aber Glanz über diffuser Streuung, so ist ein solcher Sensor ungeeignet. Auf der anderen Seite wird ein Sensor für optisch glatte Oberflächen, insbesondere ein deflektometrischer Sensor, Mühe haben, wenn die Oberfläche zu rau ist, um eine klare optische Abbildung zu ermöglichen. Es muss beispielsweise sichergestellt sein, dass die feine Struktur des Gitters noch sichtbar ist. Geringere Anforderungen an die Qualität der Oberfläche stellt das Verfahren mit Sinusstreifen, da sinusförmige Streifen ein höheres Maß an Unschärfe erlauben. Doch auch hier muss sichergestellt sein, dass die Struktur der Streifen immer noch sichtbar ist.

Die bekannten optischen Sensoren liefern also gerade bei glänzenden Oberflächen aus dem Übergangsbereich, die sehr häufig bei industriell gefertigten Produkten vorkommen, keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zu schaffen, die diesen Nachteil vermeiden.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe durch ein Verfahren mit den Merkmalen nach Anspruch 1 gelöst. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass zwei an sich bekannte Verfahren, die sich auf den ersten Blick gegenseitig auszuschließen scheinen, mit Hilfe eines besonders geformten optischen Elementes, insbesondere eines Streukörpers, kombiniert werden. Es handelt sich zum einen um ein an sich bekanntes photometrisches Stereoverfahren. Dieses Verfahren kommt an diffus reflektierenden Oberflächen zum Einsatz, versagt aber bei glänzenden Oberflächen. Zum anderen handelt es sich um ein deflektometrisches Verfahren für reflektierende bzw. transmittierende Oberflächen. Die Anwendungsbereiche beider Verfahren werden durch das optische Element derart erweitert, dass das resultierende Gesamtverfahren besonders gute Ergebnisse bei glänzenden Oberflächen liefert.

Die der Erfindung zu Grunde liegende Aufgabe wird außerdem durch eine Vorrichtung nach Anspruch 8 gelöst, die sich dadurch auszeichnet, dass zur optischen Abbildung ein Mikroskop und/oder Mikroskopobjektiv verwendet wird. Dies ermöglicht die Formerfassung von besonders kleinen Gegenständen.

Überdies wird die Aufgabe durch eine Vorrichtung nach Anspruch 11 gelöst. Diese zeichnet sich durch einen Streukörper aus. Dieser ermöglicht es, die Anwendungsbereiche verschiedener Verfahren zur optischen Formerfassung derart zu erweitern, dass sich bisher an einem Körper ausschließende Verfahren, insbesondere die Verfahren der Deflektometrie und des photometrischen Stereos, vorteilhaft zu einem neuen Verfahren, vorzugsweise für Körper mit glänzenden Oberflächen, kombiniert werden können.

Bevorzugt wird ein Ausführungsbeispiel der Vorrichtung, das sich dadurch auszeichnet, dass der Streukörper zumindest teilweise kugelförmig und/oder rotationssymmetrisch

aufgebaut ist. Dies bietet den Vorteil, dass die sich bei Beleuchtung des Streukörpers von diesem ausgehende Strahlung besonders einfach anhand bekannter mathematischer Zusammenhänge zur Formerfassung eines Gegenstandes ausnutzen lässt.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Vorrichtungen beziehungsweise Ausführungsformen des Verfahrens ergeben sich aus den übrigen Unteransprüchen.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand einer Darstellung der erfindungsgemäß kombinierten Verfahren und der Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

- Figur 1 eine bekannte Vorrichtung zur Durchführung eines photometrischen Stereoverfahrens;
- Figur 2 eine teilweise Darstellung einer bekannten Vorrichtung zur Durchführung eines deflektometrischen Verfahrens und
- Figur 3 eine schematisierte Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur optischen Formerfassung.

Das photometrischen Stereoverfahren gehört zu einer größeren Gruppe von Verfahren, die unter dem Namen „Shape from Shading“ bekannt sind. Bei diesen Verfahren geht es darum, aus der Variation der Helligkeit in einem Bild auf die Form des abgebildeten Objektes zu schließen. Betrachtet man beispielsweise die Fotografie eines Gesichtes, so stellt man Schwankungen fest, obwohl man annehmen kann, dass sich der Reflexionskoeffizient der Haut kaum ändert. Vielmehr entstehen diese Helligkeitsschwankungen dadurch, dass bestimmte Teile der Oberfläche so orientiert sind, dass sie mehr Licht zur Kamera strahlen als andere. Fällt das Licht einer Quelle senkrecht auf die Oberfläche, so ist die Helligkeit maximal, bei streifendem Einfall ist sie minimal. Ein anschauliches Beispiel bietet auch die Beleuchtung der Erdoberfläche durch die Sonne. Zur Mittagszeit im Sommer scheint die Sonne nahezu senkrecht auf die Erdoberfläche, was große Helligkeit bewirkt. Bei Sonnenuntergang streift das Licht gerade die Oberfläche und man hat geringe Helligkeit. Gelegentlich wird Shape from Shading mit dem Schattenwurf eines Gegenstandes verwechselt. Obwohl man auch aus der Schattenlinie eines Gegenstandes auf die Form schließen kann (Shape from Silhouette), ist dies bei Shape from Shading nicht gemeint. Shape from Shading gibt einen Hinweis auf die Neigung über die

gesamte Oberfläche, nicht nur entlang einer Konturlinie. Bei Shape from Shading gibt es unterschiedliche Fragestellungen.

Eine Gruppe von Verfahren beschäftigt sich damit, die Form einer als untexturiert (überall gleicher Reflexionskoeffizient) angenommenen Oberfläche zu ermitteln. Andere Verfahren bestimmen neben der Form des Objektes auch die Position der Lichtquelle (Source from Shading). Beim photometrischen Stereoverfahren wiederum ist die Position der Lichtquellen a priori bekannt und Objekttextur ist zugelassen. Dies ist im Blick auf einen vielseitig verwendbaren Sensor besonders interessant, denn in der Praxis ist die Textur meist nicht bekannt. Im weiteren geht es deshalb um ein photometrisches Stereoverfahren. Das Verfahren des photometrischen Stereo soll hier wiedergegeben werden. Man geht davon aus, dass ein zu vermessender Gegenstand mit der dreidimensionalen Form $z(x, y)$ nacheinander von drei punktförmigen Lichtquellen beleuchtet wird. Im einfachsten Fall kann man annehmen, dass sich die Lichtquellen in großer Entfernung befinden und so die Beleuchtungsrichtung über dem Objekt für jede Quelle konstant bleibt. Besonders einfache Verhältnisse liegen vor, wenn die Oberfläche als Lambert-Streuer (ideale ungerichtete Streuung) dargestellt werden kann. Beim Lambert-Streuer hängt die gestreute Intensität des Objektes nur von der Beleuchtungsrichtung und der Neigung des Objektes, nicht aber von der Beobachtungsrichtung ab. Für jede der drei Beleuchtungsquellen nimmt eine Kamera ein eigenes Bild auf. Die Position des Gegenstandes und der Kamera bleibt dabei fest.

Zur mathematischen Darstellung des photometrischen Stereoverfahrens benötigt man die drei Beleuchtungsrichtungen und den Normalenvektor $\bar{n}(x, y)$ der Objektoberfläche. Die Beleuchtungsrichtungen werden durch die Vektoren \bar{s}_1 , \bar{s}_2 und \bar{s}_3 beschrieben. Sie weisen von der Objektoberfläche zur jeweiligen Lichtquelle.

$$\bar{s}_1 = (s_{11}, s_{12}, s_{13})^T$$

$$\bar{s}_2 = (s_{21}, s_{22}, s_{23})^T$$

$$\bar{s}_3 = (s_{31}, s_{32}, s_{33})^T$$

Da sich die Lichtquellen in großer Entfernung befinden, bleiben diese Vektoren für alle Oberflächenpunkte näherungsweise konstant. Der Normalenvektor $\bar{n}(x, y)$ dagegen variiert entsprechend der Form der Oberfläche und ist als lokaler Normalenvektor zu verstehen.

$$\bar{n}(x, y) = (n_x(x, y), n_y(x, y), n_z(x, y))^T$$

Es wird angenommen, dass die Oberfläche $z(x, y)$ differenzierbar ist und der Normalenvektor überall existiert. Die Kamera nimmt die Bilder $E_1(x, y)$, $E_2(x, y)$ und $E_3(x, y)$ des Objektes auf, jeweils ein Bild mit Beleuchtungsquelle 1, 2 und 3. Die Kamera befindet sich in großer Entfernung auf der z-Achse, und jedes Bildelement nimmt die einfallende Beleuchtungsstärke $E_i(x, y)$ mit $i=1,2,3$ auf, die den Koordinaten (x, y) der Oberfläche zugeordnet werden kann. Nach dem Lambert'schen Gesetz variiert die gestreute Leuchtdichte mit dem Kosinus zwischen der Beleuchtungsrichtung \bar{s}_i und dem Normalenvektor $\bar{n}(x, y)$. Alternativ kann man die gestreute Leuchtdichte auch über das Skalarprodukt von Beleuchtungsrichtung und Normalenrichtung ausdrücken. Diese Darstellung hat den Vorteil, dass die Zusammenhänge linear dargestellt werden können. Neben der Neigung der Oberfläche und der Beleuchtungsrichtung hängt die gestreute Leuchtdichte auch vom lokalen Reflexionskoeffizienten $\rho(x, y)$ der Oberfläche (Textur) und der Beleuchtungsstärke der Quellen und den Parametern der Kameraoptik ab. Alle konstanten Faktoren wie die Beleuchtungsstärke der Quelle und die Parameter der Kameraoptik werden in der Länge des Beleuchtungsvektors zusammengefasst. Damit kann man schreiben

$$E_1 = \rho \cdot \bar{s}_1 \cdot \bar{n}$$

$$E_2 = \rho \cdot \bar{s}_2 \cdot \bar{n}$$

$$E_3 = \rho \cdot \bar{s}_3 \cdot \bar{n}$$

Diese drei Gleichungen kann man zu einer einzigen in Matrixschreibweise zusammenfassen, wenn man folgende Schreibweise für die Bilder einführt.

$$\bar{E} = (E_1, E_2, E_3)^T$$

Die Beleuchtungsvektoren bilden die Zeilen der Beleuchtungsmatrix

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{pmatrix}$$

Damit kann man schreiben

$$\bar{E} = \rho \cdot S \cdot \bar{n}$$

Aufgelöst nach \bar{n} bzw. ρ erhält man

$$\bar{n} = \frac{1}{\rho} \cdot S^{-1} \cdot \bar{E}$$

mit

$$\rho = \|S^{-1} \cdot \bar{E}\|$$

Die Beleuchtungsmatrix S lässt sich immer dann invertieren, wenn die Beleuchtungsvektoren linear unabhängig sind, sprich wenn das Objekt und die drei Beleuchtungsquellen nicht in einer Ebene liegen.

Anstelle des Normalenvektors kann man die Neigung der Oberfläche auch durch deren partielle Ableitungen nach x und y darstellen. Diese Darstellung ist vorteilhaft für die spätere Integration der Form $z(x, y)$.

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{n_x}{n_z}$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{n_y}{n_z}$$

Diese Beschreibung des photometrischen Stereo gilt für Lambert'sche Oberflächen und weit entfernte Beleuchtungsquellen. Dieser Spezialfall wurde gewählt, um die Funktion des Verfahrens möglichst einfach darstellen zu können. Für Lichtquellen in endlicher

Entfernung und Oberflächen, die nicht dem Lambert-Gesetz gehorchen, ist es möglich, das Verfahren anzupassen, was hier allerdings nicht weiter verfolgt werden soll.

Bislang liegen die Formdaten der Oberfläche als Normalenvektor $\bar{n}(x, y)$ bzw. als partielle Ableitungen

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{n_x}{n_z}$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{n_y}{n_z}$$

vor. Um die Form $z(x, y)$ zu gewinnen, müssen die partiellen Ableitungen auf integriert werden.

Neben dem photometrischen Stereoverfahren greift die Erfindung zurück auf die Deflektometrie. Den deflektometrischen Verfahren ist gemeinsam, dass sie die Ablenkung eines Strahls an einer reflektierenden bzw. transmittierenden Oberfläche bestimmen und daraus auf deren Form schließen. Sie beruhen auf dem Reflexionsgesetz bzw. Brechungsgesetz, das den Zusammenhang zwischen einfallendem Strahl, Oberflächennormale und dem reflektierten Strahl beschreibt (siehe Fig. 2). Im Fall der Reflexion liegen einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Oberflächennormale \bar{m} in einer Ebene. Der Winkel zwischen einfallendem Strahl und Normale bzw. reflektiertem Strahl und Normale ist gleich groß. Kennzeichnet man den einfallenden Strahl durch den Einheitsvektor von der Oberfläche in Richtung der Lichtquelle und den reflektierten Stahl analog durch den Einheitsvektor zur Beobachtung, so kann man eine einfache Beschreibung gewinnen. Der Normalenvektor \bar{m} bildet dann die (auf die Länge Eins normierte) Summe aus dem Vektor des einfallenden Strahls und des reflektierten Strahls.

Deflektometrische Verfahren werden bisher für optisch glatte Oberflächen verwendet. Das photometrische Stereoverfahren und das Verfahren der Deflektometrie scheinen sich auf den ersten Blick gegenseitig zu widersprechen, da die zu vermessende Oberfläche nicht

gleichzeitig optisch rau und optisch glatt sein kann. Fügt man allerdings ein geeignetes optisches Element ein, so lassen sich die beiden Verfahren vorteilhaft kombinieren. Die Kombination beider Verfahren wird im folgenden als "photometrische Deflektometrie" bezeichnet. Bei diesem optischen Element handelt es sich um einen geeignet geformten, vorzugsweise halbkugelförmigen, insbesondere zumindest teilweise rotationssymmetrisch aufgebauten, durchscheinenden Streukörper. Der deflektometrische Anteil des Verfahren findet sein Gegenüber in der glänzenden Oberfläche des Prüflings, der photometrische im Streukörper. In der beschriebenen Kombination der Verfahren ist es möglich, stark glänzende Oberflächen zu vermessen.

Eine Vorrichtung zur photometrischen Deflektometrie in Reflexion ist vorzugsweise wie folgt aufgebaut (siehe Fig. 3). Eine Kamera 1 ist auf einen Prüfling 2 ausgerichtet. Der glänzende Prüfling 2 reflektiert Licht, das von einem vorzugsweise halbkugelförmigen Streukörper 3 ausgeht in Richtung der Kamera 1. Soll das Verfahren statt in Reflexion in Transmission verwendet werden, muss die Kamera 1 in entgegengesetzter Richtung, hier von unten, auf den Prüfling 2 ausgerichtet werden. Wegen seiner Rauigkeit erzeugt der Prüfling 2 kein klares, sondern ein mehr oder weniger verschwommenes Abbild des Streukörpers 3. Das verschwommene Bild stellt kein Hindernis für das Verfahren dar, wie es sonst bei deflektometrischen Verfahren der Fall ist. Hierauf wird im weiteren noch eingegangen. Der Streukörper 3 wird seinerseits von mehreren Lichtquellen 4a, 4b, 4c,... (vorzugsweise drei) beleuchtet, die anderen sind abgeschaltet und die Kamera 1 nimmt ein Bild 5a des Prüflings 2 unter dieser Beleuchtungssituation auf. Dieser Ablauf wiederholt sich, nachdem die Lichtquelle 4b angeschaltet und die anderen Lichtquellen abgeschaltet sind, ebenso für Quelle 4c usw. Hierbei werden Bilder 5b, 5c usw. aufgenommen. In die Aufnahme schließt sich die Auswertung der Bilder 5a, 5b, 5c entsprechend des photometrischen Stereoverfahrens an. Wie oben beschrieben, kann man aus der Lage der Lichtquellen 4a, 4b, 4c und den Grauwerten der Bildpunkte der Bilder 5a, 5b, 5c auf den Normalenvektor $\bar{n}(x, y)$ bzw. die Neigung der gemessenen Oberfläche schließen.

$$\bar{n} = \frac{1}{\rho} \cdot S^{-1} \cdot \bar{E}$$

mit

$$\rho = \|S^{-1} \cdot \bar{E}\|$$

Beim gewöhnlichen photometrischen Stereoverfahren ist dies die Oberflächennormale des Gegenstandes, bei der photometrischen Deflektometrie aber die Normale des Streukörpers 3. Aufgrund der Form des Streukörpers 3 sind Rückschlüsse von der Normalen des Streukörpers 3 $\bar{n}(x, y)$ auf die Normale der eigentlich interessierenden Gegenstandoberfläche $\bar{m}(x, y)$ möglich.

$$\bar{m}(x, y) = (m_x(x, y), m_y(x, y), m_z(x, y))$$

Insbesondere besitzt eine Kugelfläche die spezielle Eigenschaft, dass jeder Einheitsvektor $\bar{r}(x, y)$ vom Mittelpunkt in Richtung der Oberfläche (radialer Vektor) parallel zum Normalenvektor $\bar{n}(x, y)$ in diesem Punkt ist (siehe Fig. 3). Der Radiale Vektor und der Normalenvektor des Gegenstandes sind wiederum über das Reflexionsgesetz bzw. Brechungsgesetz miteinander verknüpft (Deflektometrie). Ist das Objekt klein im Vergleich zum Radius der Kugel, so liegen alle Objektpunkte näherungsweise im Mittelpunkt der Kugel. Auch ohne diese Annahme kann man den Normalenvektor am Objekt berechnen, hier soll allerdings ein kleines Objekt angenommen werden, um eine einfache Darstellung zu ermöglichen. Die z-Achse des Koordinatensystems wird so gewählt, dass sie mit der optischen Achse der Kamera 1 zusammenfällt. Entsprechend dem Reflexionsgesetz gilt für den Normalenvektor $\bar{m}(x, y)$ der Oberfläche

$$\bar{m} = \text{const} \cdot (\bar{n} + \bar{e}_z)$$

mit dem Einheitsvektor in z-Richtung \bar{e}_z und der Nebenbedingung, dass \bar{m} und \bar{n} Einheitsvektoren sind. Damit kann man den Normalenvektor des Gegenstandes für eine Vielzahl von Punkten der Gegenstandoberfläche bestimmen, hieraus die partiellen Ableitung p und q und aus diesen wiederum die Form der Oberfläche $z(x, y)$.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, warum die optische rauhe Oberfläche des Gegenstandes dem deflektometrischen Prinzip keinen Abbruch tut. Die Gegenstandoberfläche liefert ein mehr oder weniger verschwommenes Bild des Streukörpers 3. Bei anderen deflektometrischen Verfahren ist dies schädlich, da in der

Regel fein strukturierte Muster wie Streifen, Punkte etc. abgebildet werden müssen. Dies ist bei der photometrischen Deflektometrie nicht der Fall. Die Helligkeit auf der Kugel variiert so gleichmäßig, dass auch bei stark verschwommener Abbildung kaum Verfälschungen auftreten.

Damit ist die photometrische Deflektometrie anderen deflektometrischen Verfahren bei rauen und glänzenden Oberflächen überlegen. Andererseits ist es auch dem photometrischen Stereoverfahren überlegen, das nur für diffus streuende Oberflächen anwendbar ist.

Ein weiterer Vorzug dieses Verfahrens liegt darin, dass bereits drei Kameraaufnahmen (entsprechend drei Beleuchtungsrichtungen) genügen, um die Form des Gegenstandes zu ermitteln. Die Zeit für eine vollständige Messung kann daher sehr kurz gehalten werden, wie es in der industriellen Mess- und Prüftechnik gefordert wird. Eine weitere Reduktion auf lediglich eine einzige Kameraaufnahme wird insbesondere erreicht, wenn die drei Lichtquellen in den Farben Rot, Grün und Blau codiert werden und zur Beobachtung eine elektronische Farbkamera 1 eingesetzt wird. Die Farbkanäle Rot, Grün und Blau enthalten die Bilder 5a, 5b, 5c der entsprechenden codierten Beleuchtungsrichtungen. Die Reduktion einer Messung auf eine einzige Kameraaufnahme stellt einen entscheidenden Fortschritt dar. Bei entsprechend kurzer Belichtungszeit können, ähnlich einer Blitzlichtaufnahme in der Fotografie, auch bewegt Gegenstände ohne wesentliche Bewegungsunschärfe aufgenommen werden.

Die bisherigen Betrachtungen sind davon ausgegangen, dass glänzende Gegenstände vermessen werden sollen. Darüber hinaus kann das beschriebene Verfahren und die zugehörige Vorrichtung aber auch für diffus streuende Gegenstände gewinnbringend eingesetzt werden. An diesen Oberflächen tritt das Prinzip des photometrischen Stereo nicht erst am Streukörper 3, sondern am Gegenstand selbst in Erscheinung. Der Streukörper 3 zusammen mit den Lichtquellen 4a, 4b, 4c usw. wirkt wie eine Reihe von ausgedehnten Lichtquellen. Räumlich ausgedehnte Lichtquellen haben den Vorteil, dass sie kohärentes optisches Rauschen, verursacht durch Speckle, minimieren können. Kohärentes Rauschen schlägt sich bei allen optischen 3D-Sensoren in der Messunsicherheit der Form nieder. Damit ermöglicht das beschriebene Verfahren die Messunsicherheit an diffusen Gegenständen zu reduzieren. Darüber hinaus kommt diese Eigenschaft auch einer präzisen Messung von glänzenden Oberflächen zu Gute.

Besonders vorteilhaft ist vorgesehen, dass die Ergebnisse der Formvermessung als Software-Datei zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht eine einfache Weiterverarbeitung derselben.

Außerdem ist es möglich, für die optische Abbildung ein Mikroskop und/oder ein Mikroskopobjektiv zu verwenden. So wird die bestehende Optik der Kamera 1 derart ersetzt und/oder ergänzt, dass auch die Oberflächen besonders kleiner Gegenstände vermessen werden können.

Bevorzugt sind als Lichtquellen auch Luminiszenzdioden (LEDs) einsetzbar. LEDs sind günstig herstellbar und liefern, je nach Ausführungsform, Licht einer bestimmten Frequenz und können deshalb vorteilhaft eingesetzt werden.

Schließlich ist es denkbar, zur Beleuchtung eine oder mehrere Blitzlampen zu verwenden. Hierdurch können etwaige Messfehler, insbesondere verursacht durch Relativbewegungen zwischen Lichtquelle, Kamera 1 und zu vermessendem Objekt, die beispielsweise durch Vibrationen oder bewegte Objekte hervorgerufen werden können, aufgrund der kurzen Leuchtdauer von Blitzlampen sicher vermieden werden. Außerdem weisen Blitzlampen vorteilhafterweise eine hohe Leuchtkraft auf, so dass die Kamera 1 entsprechend weniger lichtempfindlich ausgelegt werden kann.

Ansprüche

1. Verfahren zur optischen Formvermessung und/oder Formerfassung von optisch glatten, glänzenden oder optisch rauen Oberflächen, dadurch gekennzeichnet, dass ein photometrisches Stereoverfahren und ein deflektometrisches Verfahren durch Hinzufügen eines geeignet geformten Streukörpers (3) kombiniert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Streukörper (3) die Form einer Kugel, eines rotationssymmetrischen Körpers oder Teilen davon aufweist.
3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Ergebnis der Formvermessung in Form einer Softwaredatei zur Verfügung gestellt wird.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine elektronisch arbeitende Kamera (1) verwendet wird.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Farbkamera (1) verwendet wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtung farblich codiert ist.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass kohärentes Specklerauschen mit Hilfe einer ausgedehnten leuchtenden Streukörperfläche reduziert wird.
8. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur optischen Abbildung ein Mikroskop und/oder Mikroskopobjektiv verwendet wird.

9. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Beleuchtung eine oder mehrere Luminiszenzdioden (LEDs) verwendet werden.
10. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Beleuchtung eine oder mehrere Blitzlampen verwendet werden.
11. Vorrichtung zur optischen Formvermessung und/oder Form erfassung, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7, mit zumindest einem optischen Aufnehmer, insbesondere einer Kamera (1), und zumindest einer Lichtquelle (1,2,3;4a,4b,4c), gekennzeichnet durch einen Streukörper (3).
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Streukörper (3) zumindest teilweise kugelförmig und/oder rotationssymmetrisch aufgebaut ist.

Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zur optischen Formvermessung von optisch glatten, glänzenden oder optisch rauen Oberflächen vorgeschlagen. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass ein photometrisches Stereoverfahren und ein deflektometrisches Verfahren durch Hinzufügen eines geeignet geformten Streukörpers (3) kombiniert werden.

(Figur 3)

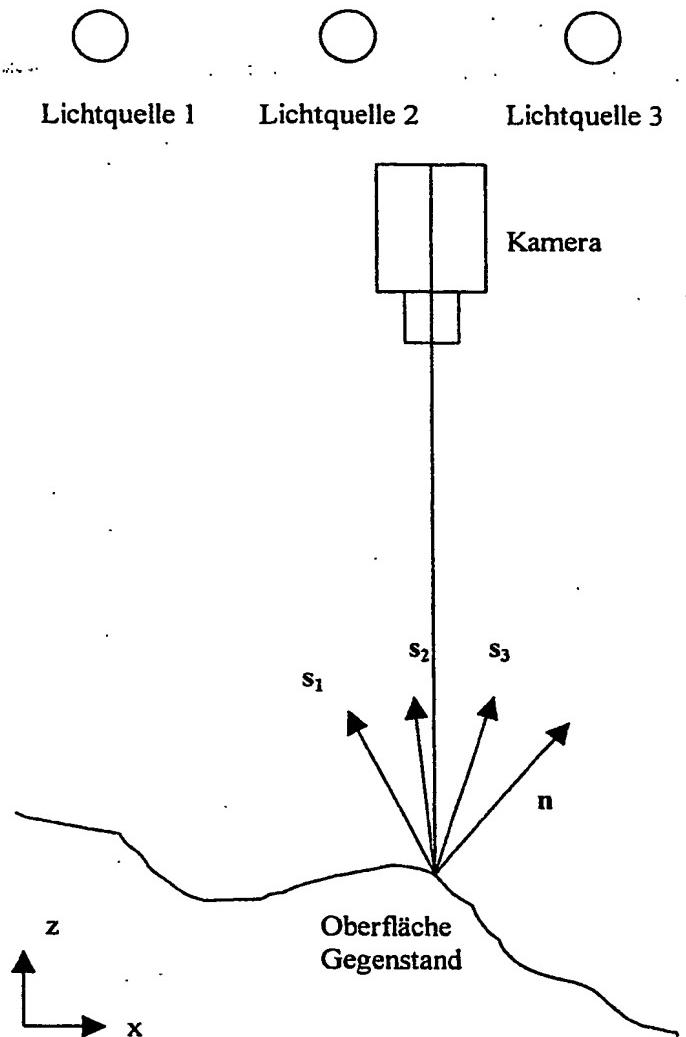


Fig. 1: Photometrisches Stereoverfahren

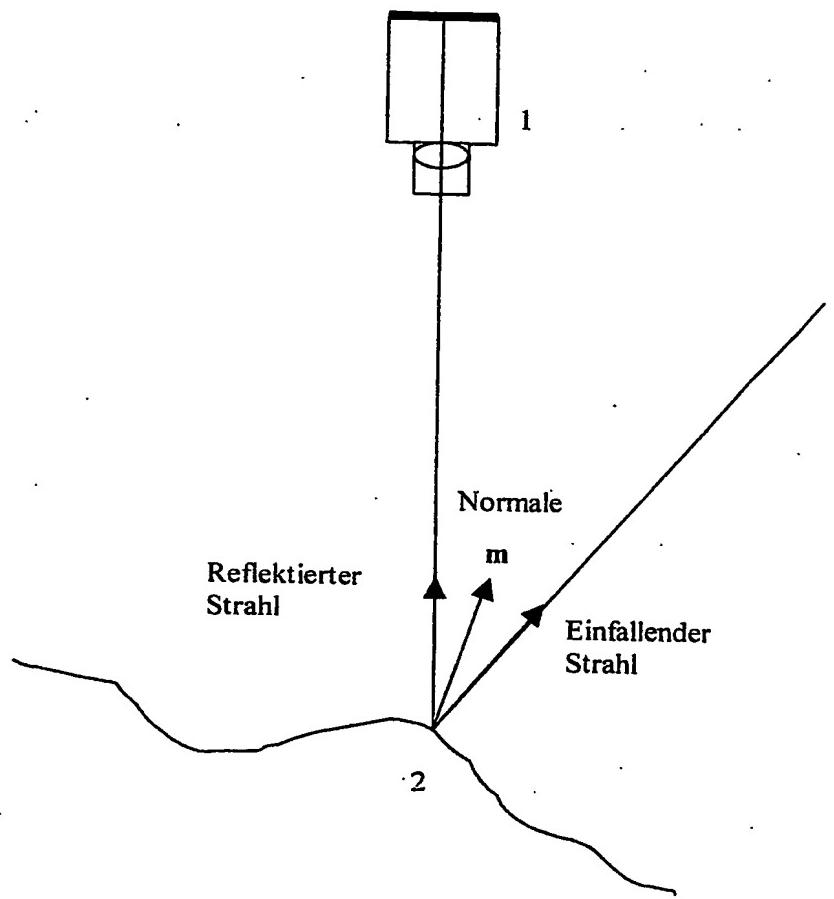


Fig. 2: Reflexionsgesetz und Deflektometrie

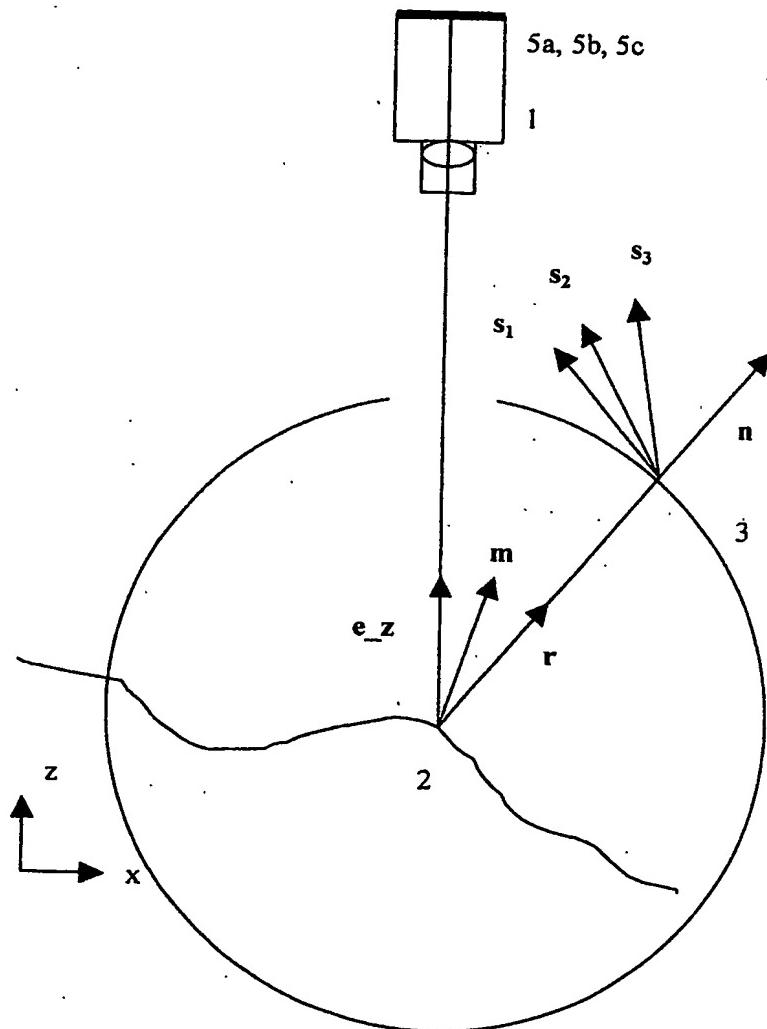
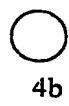


Fig. 3: Photometrische Deflektometrie